MF200 多频中波广播发射机助力广播行业发展

摘　要：MF200 多频中波广播发射机是由国家广播电视总局无线电台管理局主导研发的新一代大功率中波广播发射机，采用了最先进的直接数字驱动功放模块技术和多频自动调谐等技术，能在 60 秒内从一个频率切换到预设好的其他播出频率。该发射机已在国家广播电视总局五六一台进行了半年的试运行代播实验，各项指标均达到国家甲级标准，实测整机效率可达 90% 以上，已作为五六一台甲机房的公用备份机。本文对 MF200 多频中波广播发射机的项目研制情况及技术突破做简要分析，以期通过 MF200 多频中波广播发射机助力广播行业发展。

关键词：中波发射机；MF200；多频；数字驱动；高速串行音频

中图分类号：TN83　　　　**文献标识码：**A

文 / 徐帮辉

1. 中波发射机的现状与问题

国内外大功率中波发射机一般固定频率播出，若需要换频，则要对许多部位重新调整。以美国 HARRIS DX200 中波广播发射机为例，调整的部位有预驱动、驱动级、效率线圈、输出匹配网络以及部分板卡等，这一系列调整要耗费大量的时间和人力，对于不同频率中波发射机之间短时间内代换几乎不可能，这将严重影响到无线局安全传输发射工作。

五六一台甲机房安装有三部 DX200 中波发射机，单机播出，无备份机和代播台站，出现故障时就必须依靠技术人员现场处理。如果故障较大或者处理不及时就有可能引起长时间的停播，急需安装备用中波发射机。为解决这一难题，在国家广播电视总局和无线局领导支持下，国家广播电视总局五六一台于 2010 年专门成立了“MF200 多频中波广播发射机”研制项目小组。依托无线电台管理局、北京广世无线责任有限责任公司、国家广播电视总局五六一台等单位的科研力量，历经 6 年钻研，自主研发出 MF200 多频中波广播发射机，打破国外对中波发射机技术的垄断，实现了单 PB 中波发射机一机备多频的目的。

2. MF200 多频中波发射机系统设计框架



图 1　MF200 多频中波广播发射机

MF200 多频中波发射机包含了射频、音频、控制、保护和电源等系统，并采用自主研制的直接数字驱动功放模块。与 DX200 中波发射机相比减少了缓冲级、预驱动级、驱动级等复杂的射频前级放大和调谐部件，功放模块数量也从 239 块减少到 224 块。模块控制信号采用高速串行同步传输技术，大量减少了线路连接。该系统采用宽频率设计，能够在 60 秒内完成不同预设频率间的倒频切换，实物图如图 1 所示。

3. 系统原理

MF200 多频中波广播发射机是一种全新设计的全固态 200kW 多频中波广播发射机，该发射系统包括射频、音频、控制、保护和电源等系统。另外，还配套设计的天线交换开关及其控制系统和 400kW 假负载。

3. 1 射频系统

发射机射频系统包含直接数字驱动功放模块、射频音频分配板、模块控制板、音频处理板射频模块、输出匹配网络和天线交换开关等。

3.1.1 直接数字驱动功放模块

模块采用差分 PECL 平衡输入，减少了高频干扰对输入的影响，采用可编程逻辑器件 PAL22V10 以及大量的贴片芯片，提高了模块的集成度。主要电路包括：射频输入转换电路、模块控制与监测、开关电源、射频隔离与驱动以及 8 个 MOS 场效应管 IRFP460LC 组成的 H 桥输出电路。直接数字驱动功放模块基本原理如图 2 所示。

3.1.2 射频音频分配板射频模块

射频音频分配板射频模块主要是根据接收来自音频处理板的载波信号和位频（16 倍载波频率），设计载波时钟分配模块，将位频重新进行分频得到载波同步参考频率 Fc。

3.1.3 模块控制板

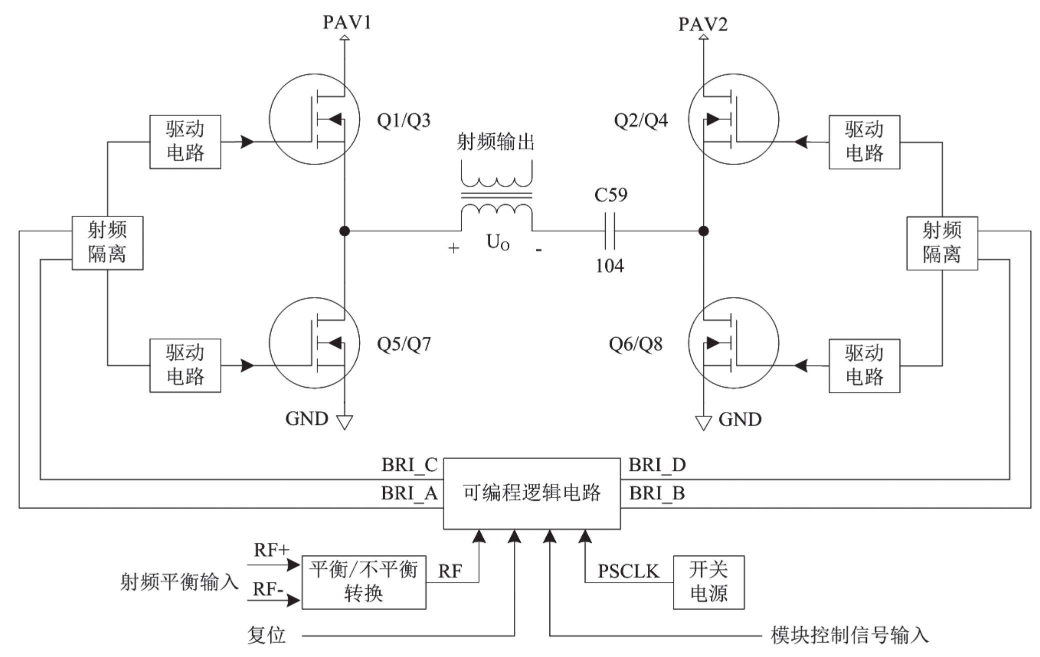


图 2　直接数字驱动功放模块基本原理框图

模块控制板接收来自射频音频分配板 I^2S 结构串行 12bit 数字音频数据，采用 EPM7128SLC84 芯片组成 CPLD 在线可编程电路对串行数据进行解码，解码后的信号通过合成器母板送到所控制的 8 块直接数字驱动功放模块，从而控制功放模块的开通与关断。

3.1.4 音频处理板射频模块

音频处理板是数字调制器核心的功能处理部件之一，接收来自外部的射频和音频信号并对其进行处理。射频处理单元根据外部输入的 10MHz 标准频率或者 10 倍载波频率，利用 FPGA 内部的锁相环 PLL 模块生成位频，通过设计分频模块得到载波频率，利用 I^2S 串行数据的传输模式将位频和载频结合音频信号发送给射频音频分配板。

3.1.5 输出匹配网络

输出匹配网络用于对合成输出的波形进行谐振和阻抗匹配，得到想要的光滑调幅波。输出匹配网络主要包含两个部分，一是用阻抗匹配的真空电容和电感，以及分段切换的 4 个断路器和改变可调真空电容值的 4 个调谐马达；二是用于调谐控制的输出匹配网络切换控制板。

匹配网络硬件示意图如图 3 所示，其中 L1 和 L2 通过断路器来实现电感切换，C1、C2、C3 和 C4 通过调谐马达实现电容值的变换。

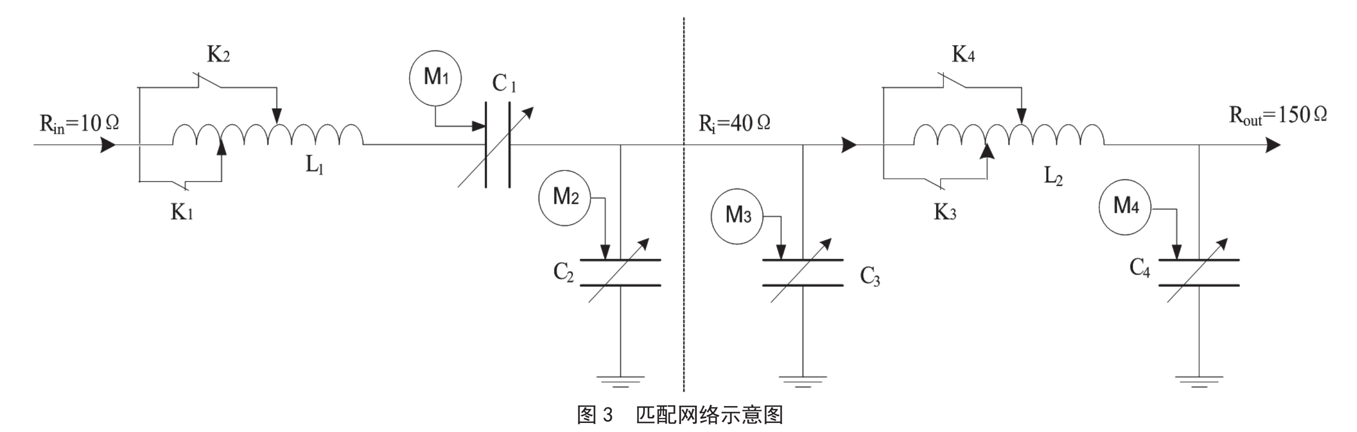


图 3　匹配网络示意图

3.1.6 天线交换开关

天线交换开关系统主要包括主备用发射机的数据采集系统、基于 CPLD 数据逻辑处理与分析系统、用户界面操作与显示系统等。

3.2 音频系统

音频系统主要是基于 FPGA+DSP 平台完成发射机数字调制器的设计，其核心是完成对音频信号调制处理、载波合成及控制输出，如图 4 所示。

音频系统主要包括音频信号采样及处理、音频采样率转换、音频 + 直流、功率控制、指标补偿等。

3.2.1 音频信号采样及处理

音频处理板 ADSP-21489 通过对外部芯片 ADAU1961 配置完成对模拟音频 48kHz 采样率信号的接收。同时，利用内部 SPDIF 接口完成外部数字信号输入的接收。音

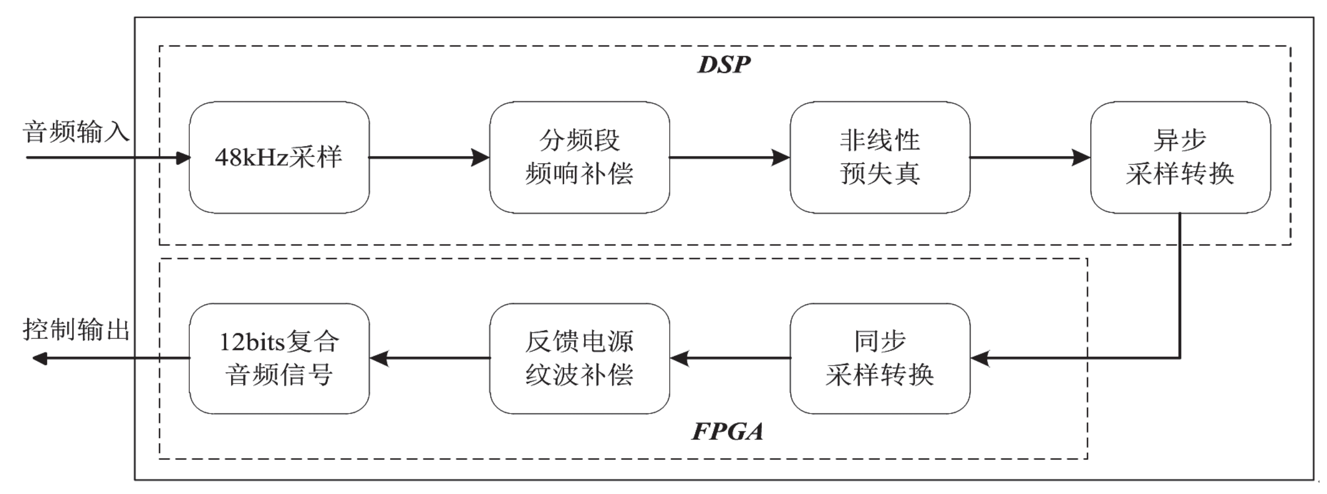


图 4　音频系统处理流程框图

频信号处理包括了 FIR 低通滤波器和 CIC 内插补偿滤波器等单元。

3.2.2 音频采样率转换

输入音频信号采用标准的 48kHz 采样率，与载波信号一般不成整数关系，因此本系统设计采用了二次自适应采样率转换方法来实现。ADSP-21489 内部集成了异步采样率转换器，通过 DSP 中的异步采样率转换和 FPGA 同步采样率转换实现将信号的采样率提升至载波频率上。同步采样率转换利用 CIC 内插滤波器实现。

3.2.3 音频系统射频处理单元

射频处理单元是根据实际载波需要，将音频数据进行载波合成输出。利用 FPGA 内部的锁相环 PLL 模块，通过设计分频子模块分频得到 1/8 载波频率、8 倍载波频率、载波频率等所需的各频率分量。

3.2.4 音频 + 直流

经过采样率转换的音频信号 Audio，利用加法器叠加一个直流值 DC，得到 12bits 复合音频输出信号。后级调制编码分配板根据接收的 12bits 信号数据，经过编码分配和载波频率控制实现音频信号调制。

3.2.5 功率控制

功率控制主要包括以下几个功能：

（1）开机功率等级控制（高、中、低）；

（2）功率微调（升功率操作、降功率操作）；

（3）步进升功率及功率反馈控制。

3.2.6 指标补偿

对发射机的频响和失真指标提升，在 DSP 中利用算法实现。频响补偿利用多组滤波器将信号频段进行分段处理，射频功放非线性失真使用预失真技术，利用 Volterra 多项式预失真器实现对基带音频信号的预失真补偿，降低输出信号的谐波和互调失真。电源纹波补偿是

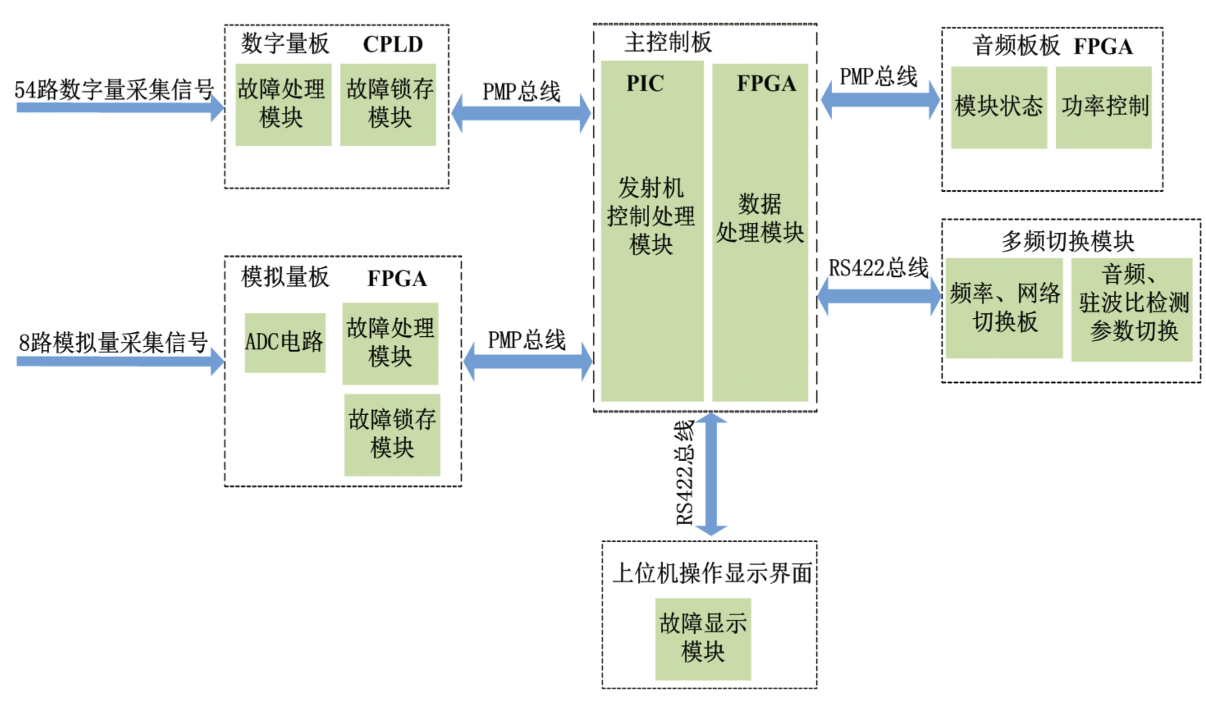


图 5　调制器控制系统框图

为了提高发射机杂音电平指标，通过利用外部 AD 取样芯片实现对电源电压反馈信号高速取样，并在 FPGA 中利用乘法器实现对实时反馈电源纹波信号的抵消处理，降低杂音电平。

3.3 控制和保护

MF200 多频中波发射机控制系统主要由主控板、数字量板、模拟量板、多频切换模块、上位机显示操作界面构成，如图 5 所示。其中主控板主要由 32 位 PIC 处理器和 FPGA 组成，共同完成对发射机的相关控制，主控板 FPGA 主要采用多通道 DMA 数据采集传输控制器以及通用可扩展的数据总线接口实现对主控板外设输入、数字量板、模拟量板、音频板等板卡的数据采集和传输，最终交由 32 位 PIC 单片机对系统进行相应控制处理；数字量板主要实现对发射机各数字信号的实时采集，并通过 DMA 数据通信总线传输至主控板，接受主控板相应执行命令并输出控制信号；模拟量主板要实现对发射机各模拟量状态进行实时采集，并通过 DMA 数据通信总线传输至主控板；多频切换模块主要是在发射机换频播出需要对发射机输出匹配网络的调整、载波频率的设置检测、音周以及驻波比检测参数等进行切换；上位机显示操作界面主要实现发射机各状态显示、开关机等具体操作、发射机运行数据保存以及换频调谐操作等功能；音频板完成数字音频抽样率变化，功率控制，预失真矫正处理，然后打包成 16 倍载波频率串行信号传输给射频音频分配板。

MF200 多频中波广播发射机内设计了各种监测与保护电路，主要有温度、风量、弧光以及驻波比等监测与保护电路措施，可以确保发射机设备安全。

3.3.1 温度监测

整流柜可控硅、续流二极管、250V 电源滤波电感以及放电板上均安装了温度开关，用于检测相应设备的温度情况。当有设备的温度超过一定值时，温度开关就会动作，产生相应的监测信号送至调制器控制器进行处理。

3.3.2 风量监测

每个机柜均设有风量检测板，用于监测相应机柜内的风量情况。当有任何一个机柜的风量异常时，发射机会降功率直至关机，从而保护设备。

3.3.3 弧光监测

在机器功放机柜和网络机柜内均安装了弧光检测板，用于监测机柜内有无打火情况。当有机柜内出现了打火情况，弧光检测板检测后输出故障信号，发射机会降功率；若打火现象一直存在，发射机将关机保护设备。

3.3.4 驻波比取样保护

驻波比取样保护包括自动切换控制电路、网络电压与电流调谐、幅度调整电路等电路。它能根据调制控制器发送来的 3 比特频率信号，启动自动切换控制电路产生控制信号，分别对天线电压、天线电流、网络电压、网络电流取样信号进行一系列的处理，获得网络驻波比、天线驻波比取样信号和相位检测信号，供调制控制器进行相应的处理，用以保护发射机。

3.4 400kW 假负载

400kW 风冷假负载是国家广播电视总局五六一台自主研发的一种大功率假负载。它采用定制的 80 根 12 千欧，标称功率为 5kW，误差为 ±5% 的大功率无感空心绕线电阻并联组成，输出阻抗为 150 欧姆左右，最大可承载功率为 400kW，大于载波 200 kW 的 1.5 倍，热状态时单个最大承受功率为 5kW，大于载波时的 2.5kW，满足功率设计需求。该电阻采用空心绕线电感，具有良好的通风效果，可通过风机进行强制冷却，特殊工艺制作，温度飘移小，在热状态下工作稳定，利用不锈钢卡箍进行固定，连接可靠，接触电阻小，假负载实物图如图 6 所示。



图 6 假负载实物图

4. 电源部分

多频机电源由 3Φ197VAC、3Φ380VAC、+250VDC、+125VDC、+48VDC 以及 +12VDC 组成，如图 7 所示。

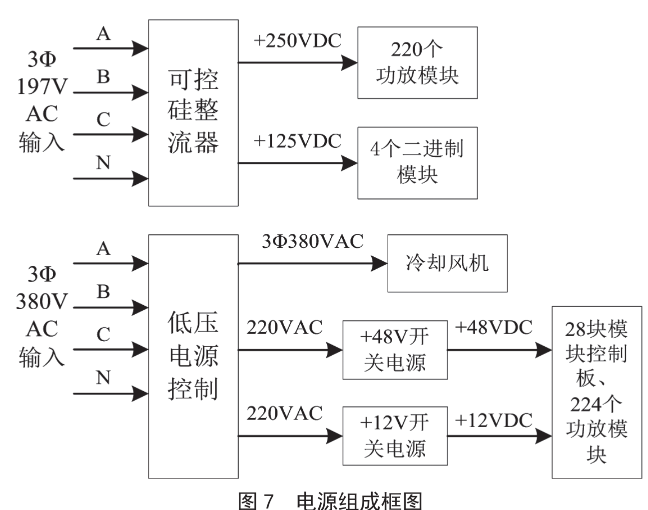


图 7 电源组成框图

5. 技术创新点

主要技术创新点：

5.1 中波发射机多频自动切换技术

功放单元采用自主专利技术的直接数字驱动功放模块，省去了类似 DX 发射机的射频前级驱动放大部分。射频滤波输出采用两级输出网络，即输出匹配网络柜及 Π 网络柜，并用真空断路器切换网络电感，步进电机控制真空可调电容的方式，从而将射频网络调整到所需的

参数，实现完美调谐。

5.2 直接数字驱动技术

直接数字驱动功放模块采用差分 PECL 平衡输入，从而减少射频输出对输入的影响。另外，采用了可编程逻辑器件 PAL22V10 以及大量的贴片芯片，大大提高了模块的集成度。

5.3 输出网络自动快速切换技术

输出匹配网络主要包含两个部分：一是用于阻抗匹配的真空电容和电感，以及分段切换的 4 个断路器和改变可调真空电容值的 4 个调谐马达；二是用于调谐控制的输出匹配网络切换控制板。

5.4 非线性数字预失真技术

由于功放模块合成非线性、电源纹波等原因造成直接数字驱动功放模块合成具有非线性。因此必须经过预失真补偿技术才能达到甲级标准。该系统在数字域采用多波段预失真技术解决分线性失真问题。从而满足发射机技术指标非线性失真的要求。

5.5 驻波比检测电路自动切换技术

采用驻波比检测电路自动调整技术，能够根据设置频率自动切换到相应参数，从而保证发射机在高效换频后能够安全可靠地工作。

6. 应用情况

MF200 多频中波广播发射机于 2016 年 12 月 13 日 17:00 起，在五六一台甲机房试播江西新闻综合频率（729kHz），至 2017 年 6 月 13 日 17:00 止，共计试播 3023 小时 12 分 09 秒。试播期结束后，作为甲机房三部 DX 发射机的公用备份机。截至 2019 年 4 月，共计代播 7 次，代播时长 95 小时 13 分，减少停播时间约 22446 秒（合 6 小时 14 分 6 秒）。

结语

MF200 多频中波发射机是自主研发的新一代大功率中波广播发射机，多项技术在国内国际属于首创，发射机系统布局合理，工艺先进，运行稳定可靠，试播半年，作为五六一台甲机房公用备份机已运行二年多，各项指标都达到了国家规定的甲级，整机效率可达 90% 以上，高于 DX200 中波发射机的整机效率 86%，其科技自主创新程度高，打破了国外对中波广播发射机的技术垄断，该发射机研制成功在我国大功率中波广播发射机领域具有战略意义和社会价值，值得大规模推广运用。媒

（作者单位：国家广播电视总局五六一台）